编码协作 MIMO 传输方案在 DVB-T2 数字地面电视中的应用

摘　要：数字地面电视是一种现代广播技术，广播公司使用该技术提供带有高质量影像和声音的电视服务。本文主要讨论了，在现代数字广播系统中应用编码协作多输入、多输出 MIMO 传输方案，实现额外的发射分集和编码增益。主要思想是，基于低密度奇偶校验码实现一个编码协作 MIMO 方案。编码协作传输可以获得健壮的向前纠错能力。通过这种方式，可以实现更稳定的系统性能，提高下一代手持系统的移动性。为了展示潜在的实际应用，基于第二代地面数字电视广播（DVB-T2）系统对该方法的性能进行了评估。仿真结果表明，此方法可以用于支持高移动手持设备的 DVB 广播系统的发展，例如下一代手持数字电视广播（DVB–NGH）系统。

关键词： 数字电视广播；协作传输；MIMO；DVB-T2

中图分类号：TN919.3+1　　**文献标识码：**A

文章编号：1671-0134（2017）07-082-04　　**DOI：**10.19483/j.cnki.11-4653/n.2017.07.026

■文 / 张一阳

引言

世界各国（美国、欧洲、日本等）都在进行高画质、先进电视系统的研究。由于各种技术、组织和政治原因，导致世界不同地区应用多套数字电视（Digital TV，DTV）标准。[1] 现在，在工业领域对模拟数字转换的需求也越来越大。广播系统也不例外，许多国家已经在促进其广播系统向数字化方向发展。地面电视平台从模拟到数字技术的转换，促使了电视市场的经济增长。[2]

在 DTV 系统中，单频网络（single frequency network，SFN）传输方案具有显著优势。通过使用 SFN 方案，广播系统可以在任意大的面积内使用同一频率执行相同的数据。在 SFN 系统中，一个站在同一频率下将相同的节目转播给另一个站，或几个站在相同的频率下同时播放相同的节目，这样可以提高频谱的利用率。在这种情况下，信号从每个基站传输时需要时间同步，最基本的方法是通过全球定位系统（GPS）进行同步。

1. 研究现状

MIMO 技术被认为将会是下一代地面广播电视系统，因此在 MIMO 方面的研究也逐渐增多。有学者提出了一种利用独立或迭代映射的接近额定容量 MIMO 坐标交织编码调制方案。[3] 在需要更高的传输速率和频谱效率时，该方案将有更广泛的应用。

在 DTV 系统中应用 MIMO 技术来提高 SFN 系统优势方面的很多研究已经有了一定进展。有学者通过研究基本信道参数、交叉极化率、空间相关性、4×4 的 MIMO 天线配置等，研究了 MIMO 无线信道在 UHF 波段的特点。文献 [4] 中，针对 DTV 系统的分集增益提出了一种新的 SFN 模型。为了实现空间分集，作者采用了 MIMO 系统。此外，在 SFNs 的 DTV 广播系统中还提出了一种 3D MIMO 方案。[5] 作者表明，3D MIMO 方案能高效应对 SFN 方案中接收权利平等与否问题。

在发展下一代地面数字电视广播（DVB-T）系统的背景下，有学者已经研究了包含 MIMO 和正交频分复用（OFDM）技术的 DTT 广播系统。[6] 还有将开发的软件应用于移动接收，并分析和证明了该方法对 DVB-T 网络的影响。为了评估 DVB-T2 在现实场景中的性能，也有文章进行了 2×2 MIMO 的实验。

许多 DVB-T2 的研究从 2006 年开始就一直在进行。已经进行的工作有：在某些参数（如保护间隔，FFT 大小）方面对 DVB-T2 的移动性能进行评估，还有些利用旋转星座进行的研究测试。[7] 但是 MIMO 技术尚未应用于 DVB-T2 标准。根据 DVB-NGH 的建议，MIMO 技术将是下一代广播标准的研究领域之一，这也将有助于提高信道容量。

在本文中，调查了在 DTT 系统中利用编码协作 MIMO 传输方案实现发射分集，并参考 DVB-T2 系统的参数进行了物理层仿真，还利用一些时间交织块的方法，为众多基站的协作提供了编码协作传输方案。

2. DVB-T2 系统

DVB-T2 系统的输入可能是一个或多个 MPEC-2 传输流和 / 或通用流。待传输的业务需要先通过一个输入预处理器，它包含一个业务分割器或解复用器，用于将业务分成 T2 系统的输入，这些输入是一个或多个逻辑数据流。预处理后的输入接下来被传输到个人 PLPs 中。DVB-T2 使用一种叫“旋转星座”的新颖技术，该技术为显著改进系统鲁棒性提供了

可能，尤其在地面频道的情况下效果更好。系统的输出通常是在射频通路上传输的单天线信号。系统也可以生成在另一组天线上传输的另一组输出信号，这被称为“MISO 传输模式”。

DVB-T2 标准有附加的 16k 和 32k 载波模式，在保护间隔中，这可以在不增加预计开销的情况下增大 SFNs。DVB-T2 最大的保护间隔超过 500，这足以实现一个大型国家的 SFN。DVB-T2 标准定义了八个模式，可以根据 FFT 大小和特定的传输保护间隔选择这些模式。当保证足够的信道估计时，这种方法可减少导频开销。交织的概念在数字信号传输技术中是很常见的。这一概念的目的是在时间或频率平面上将数字内容分开，使脉冲噪声和频率选择衰落不破坏原始数据流的长序列。

DVB-T2 标准实现了交织阶段的四种类型。如果数据符号在 SFBC 之前被频率交织器块交织，数据符号就会与空频映射结合，从而受到相同衰减系数的影响。[8] 然而，数据符号在 SFBC 块之后被频率交织，数据符号有不同的衰减系数，这可以提高传输分集技术。本文中建议在保持传统 DVB-T2 系统的前提下，以最小的变化修改 DVB-T2 系统模型。

4. 方案

协作分集是一种众所周知的协作系统方案，该方案多个节点协作形成一个虚拟的多天线阵列。[9] 在衰减环境中，多重天线可以利用空时编码，提高无线通信链路的容量和可靠性。科学家最近对 ad-hoc 网络方面的兴趣越来越浓厚，他们已经在研究利用网络中不同用户的天线来开发空间和传输分集。也有研究利用重复和空时算法改善空间分集。在 SFN 系统中编码协作为协作分集提供了另一个方案。

3. 1 编码协作传输方案

DVB-T2 系统包括多种获取分集收益的方法。这里为 DVB-T2 系统提出的编码协作传输方案主要关注编码收益。该方案为协作传输增加了 FEC 编码合并的方法。这种编码合并方法可以降低码率，提高移动节点的编码增益。该编码协作传输方案如图 1 所示。

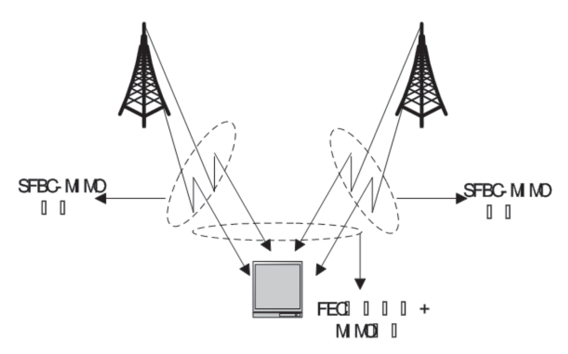


图 1　编码协作传输方案例子

这项工作的主要目的是找到一种使新编码增益有效并与 DVB-T2 系统保持相同传输效率的方法。这里提出的协作传输机制使用 1/3 或 1/4 LDPC 码率。然而，DVB-T2 系统没有实现这些 LDPC 码率。DVB-S2 系统中使用的 LDPC 编码器块提供 DVB-T2 系统的 LDPC 编码器核心，所以这里利用一个 DVB-S2 LDPC 编码块进行实现。

3. 2 1/3 码率

3.2.1 编码协作方案

下面是 1/3 码率的编码协作传输方案的一个示例（图 2）。每个基站生成一个预定义的 1/3 内码 $C=[S;P_1;P_2]$，S 是对称的数据位，P_1 和 P_2 分别是 1 和 2 奇偶校验位。每个基站为了基于提出的 FEC 类型冲压一个奇偶校验位，在内部 FEC 过程之后，其将产生一个 1/2 率的新内码。例如，如图 2 所示，基站 A 产生原始内码 C，并根据提出的 FEC 类型，冲压一个奇偶校验位。最后，基站 A 就会有一个新的码字 $C=[S;P_1]$，并将其发送。基站 B 过程与基站 A 类似。最后，每个基站可以处理 MIMO 分组码 SFBC 或 STBC，也可以用来发送改变的码率数据。

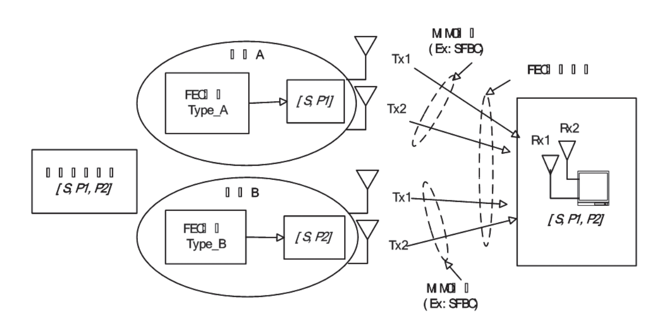


图 2　编码协作方案例子 – 原始码率 1/3

3.2.2 协作传输方案

在一个无线通信系统中，通常其他基站的信号会造成小区间干扰。干扰会降低无线系统的性能，所以需要一个帧传输方案防止干扰。当传输完全不同的信息时帧应该被分开。下面是两个基站之间的协作传输方案的例子。

每个基站有不同的帧起始偏移量和帧跳跃指针。假设所有的基站使用 GPS 获得完全同步的时间，传输帧的尺寸也相同。基站 A 的帧起始偏移量是 0，帧跳跃指针是 2。在帧周期（T_{FRAME}）期间，基站 A 传输第一个帧。当传输结束后，基站 A 等待 T_{FRAME} 时间。此外，还为一个 T2 帧指定了帧跳跃指针。当传输开始时，基站 B 等待给定的帧起始偏移的时间，基站 B 的帧起始偏移指定值为“1”。在等待 T_{FRAME} 时间后，基站 B 就可以传输第一个帧了。具体传输方案如下图 3，这些帧的映射方案来源于 DVB-T2 标准中时间交织器映射方法 [10]。

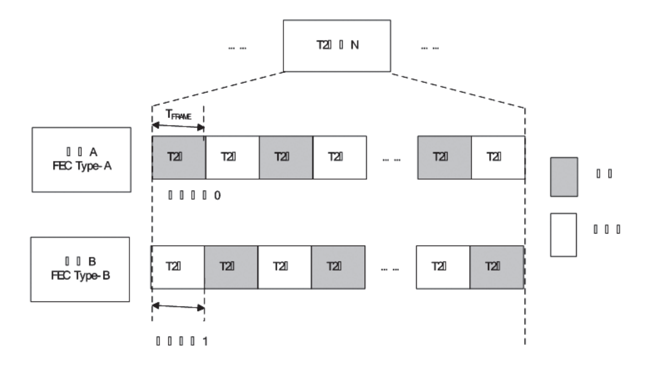


图 3　两个基站的协作传输方案例子 – 利用 T2 帧部分

传输过程也可利用未来扩展帧（FEF）。FEF 是两个 T2 帧之间的超帧的一部分。FEF 部分的过程与帧映射方案类似，

每个基站有自己 FEF 部分的偏移量和跳跃指针。这里不再赘述。

在交织阶段，DVB-T2 和 DVB-T 之间最大的区别是 DVB-T2 引入了时间交织，它能更好的避免脉冲噪声和时间选择性衰落。

3.2.3 信号传输计算

假设在基站 A、B 和目标节点应用两个天线。基站 A 将传输冲压码字 $C=[S;P_1]$，同时基站 B 将传输冲压码字 $C=[S;P_2]$。为了 FEC 之后的 MIMO 过程，当 T2 帧根据传输方案传输时，基站在传输天线上使用 SFBC 映射方案。被传输的比特流被空频编码器编码成大小为 N 的块。带有两个天线的数据符号 S_i 的映射方案为：对于副载波 i，天线 1 对应的为 S_i，天线 2 对应的为 $-S_{i+1}^*$；对于副载波 $i+1$，天线 1 对应的为 S_{i+1}，天线 2 对应的为 S_i^*。

共轭复数值用（.*）表示。选择 SFBC 的映射方案，这样原始数据可以在没有任何修改的情况下，在第一个天线上传输。噪音在接收机端添加。

基站 A 传输的信号中检测到的数据符号是

$$Rx1=\begin{cases}\hat{S}=(\|h_{11}\|^2+\|h_{12}\|^2)S+h_{11}n_{1,l}+h_{12}n_{1,l+1}^* \\ \hat{P}_1=(\|h_{11}\|^2+\|h_{12}\|^2)P_1+h_{11}^*n_{1,l}-h_{12}n_{1,l+1}^*\end{cases} \quad (1)$$

$$Rx2=\begin{cases}\hat{S}=(\|h_{21}\|^2+\|h_{22}\|^2)S+h_{21}n_{2,l}+h_{22}n_{2,l+1}^* \\ \hat{P}_1=(\|h_{21}\|^2+\|h_{22}\|^2)P_1+h_{21}^*n_{2,l}-h_{22}n_{2,l+1}^*\end{cases} \quad (2)$$

基站 B 传输的信号中检测到的数据符号是

$$Rx1=\begin{cases}\hat{S}=(\|h_{13}\|^2+\|h_{14}\|^2)S+h_{13}n_{1,l}+h_{14}n_{1,l+1}^* \\ \hat{P}_2=(\|h_{13}\|^2+\|h_{14}\|^2)P_2+h_{13}^*n_{1,l}-h_{14}n_{1,l+1}^*\end{cases} \quad (3)$$

$$Rx2=\begin{cases}\hat{S}=(\|h_{23}\|^2+\|h_{24}\|^2)S+h_{23}n_{2,l}+h_{24}n_{2,l+1}^* \\ \hat{P}_2=(\|h_{23}\|^2+\|h_{24}\|^2)P_2+h_{23}^*n_{2,l}-h_{24}n_{2,l+1}^*\end{cases} \quad (4)$$

这里 l 是第 l 个副载波指针。

接收到的信号在被信道估计处理后，再被合并处理，并发送到最大似然检测器。经过 MIMO 解码过程和合并处理后，接收到的信号如下：

$$\hat{S}=(\|h_{11}\|^2+\|h_{12}\|^2+\|h_{21}\|^2+\|h_{22}\|^2+\|h_{13}\|^2+\|h_{14}\|^2+\|h_{23}\|^2+\|h_{24}\|^2) \quad (5)$$
$$+h_{11}n_{1,l}+h_{12}n_{1,l+1}^*+h_{13}n_{1,l}+h_{14}n_{1,l+1}^*+h_{21}n_{2,l}+h_{22}n_{2,l+1}^*+h_{23}n_{2,l}+h_{24}n_{2,l+1}^*$$

$$\hat{P}_1=(\|h_{11}\|^2+\|h_{12}\|^2+\|h_{21}\|^2+\|h_{22}\|^2)P_1+h_{11}^*n_{1,l}-h_{12}n_{1,l+1}^*+h_{21}^*n_{2,l}-h_{22}n_{2,l+1}^* \quad (6)$$

$$\hat{P}_1=(\|h_{13}\|^2+\|h_{14}\|^2+\|h_{23}\|^2+\|h_{24}\|^2)P_2+h_{13}^*n_{1,l}-h_{14}n_{1,l+1}^*+h_{23}^*n_{2,l}-h_{24}n_{2,l+1}^* \quad (7)$$

3.3 1/4 码率

现在简单描述一下两个和三个基站实现 1/4 码率的编码协作传输方案的例子。每个基站生成一个 1/4 内码字 $C=[S;P_1;P_2;P_3]$，S 是一个对称的数据位，$P_1;P_2;P_3$ 分别是奇偶校验位 1、2、3。在 FEC 过程后，每个基站根据它自己的 FEC 类型，将其中一个 FEC 块分成两部分。基站 A 生成一个原始的 1/4 内码字 C'，并将 FEC 块分成两部分 $C_1=[S;P_1]$ 和 $C_2'=[P_2;P_3]$。最后，基站 A 可以从被分割的 FEC 部分 C_1 或 C_2' 中的选择一个，然后将会传输选择的 FEC 部分。基站 B 和基站 A 的过程类似。如果基站 A 选择了 FEC 中 C_1，基站 B 就会选择 C_2'，反之亦然。

如果要实现三个基站协作传输方案，可以考虑其他编码类型。每个基站生成一个默认的 1/4 内码字 C'，然后分割、重组默认码字为 $C_1=[S;P_1]$，$C_2=[S;P_2]$，$C_3=[S;P_3]$。每个基站选择一个新的与其他基站不同的码字，并且处理 SFBC MIMO 块编码。最后，每个基站遵循协作传输方案来传输数据。

上面介绍了，两个和三个基站的编码协作场景中 1/3 和 1/4 码率编码方案。在前面的例子中，两个和三个协作基站应传输不同的信息。在传输完全不同信息的时候，传输帧应该被分开。在两个基站执行 1/3 编码协作方案或在三个基站执行 1/4 编码协作方案时，每个协作基站包含共享信息 S。如果每个协作基站共享一些信息，可以使用另一种传输方法。可以将其中一个新的 FEC 块 C_n 分成两部分，对称部分 S 和奇偶校验位部分 P_i。因为所有的基站都包含对称部分，所以可以同时传输 S，这样在接收端合并过程后，可以获得分集收益。然而，因为 P_i 在每个基站中是不同的，应该在不同的时间传输 P_i。

4. 仿真结果

这里我们给出了模拟参数并进行了论证，并对 1/3 码率进行了仿真。在仿真中，假定了近似慢瑞利衰落信道和理想信道。大部分仿真参数是按照 DVB-T2 的标准设置的。因为 MIMO 传输方案的试点模型并不适用，所以在 MIMO 过程中使用 MISO 传输参数。仿真中，应用了一个 8K 的 FFT 采样数和 8MHz 的信道带宽。每个符号的载波数量、P2 符号的数量以及其他载波的数量分别是 6817、2 和 48。传输帧的大小为 250ms，这是 DVB-T2 中最大的帧尺寸。选择短 LDPC 块作为内部编码类型。FEC 块的长度是 16200，在 DVB-T2 标准中没有应用 1/3 和 1/4LDPC 码率。因为 DVB-T2 标准的 LDPC 编码源自于 DVB-S2 标准，所以仿真中应用 DVB-S2 标准的 1/3 和 1/4 LDPC 来生成矩阵。内部解码器迭代次数是 50。具体如表 1 所示。

表 1　仿真参数

参数	值	参数	值
FFT 大小	8K	外部编码	BCH
信道带宽	8MHz	内部编码	短 LDPC 块 (16,200)
帧大小	250ms	调制阶数	QPSK, 16-QAM
保护间隔	1/8	星座旋转	QPSK: 29° ，16-QAM: 16.6°
导频图案	PP1	子片	270
		信道模型	DVB-T P (Rayleigh)

仿真设计基于两个基站、1/3 码率的编码协作模型（如图 2）。根据提出的方案，仿真测量了比特误码率（BER）性能，每个符号能量与噪声功率谱密度比（E_s/N_0），并将其性能与传统的没有协作的 SFBC 方案进行了对比。SFBC 协作对应的编码协作方案如图 3 所示。在图 4 中，[1B ,*SFBC MIMO*] 意味着利用一个 1/2 率 LDPC 编码，基于一个基站传输 Alamouti SFBC 传输方案。[2B ,*repetiton,w/o code cooperation*] 意味着 Alamouti SFBC 传输方案是基于两个基站的，并且没有用提出的编码协作方案，每个基站传输相同的数据，目标节点重复接收相同的数据。[2B ,*repetiton I ,w/ code cooperation*] 是提出的方案，数据传输速率和在 2BS 常规方案是一样的。在 2BS 常规方案中，每个基站共享相同的对称数据，但是奇偶校验数据是不同的。这些不同，使得提出的方案在目标节点处获得合并编码增益。

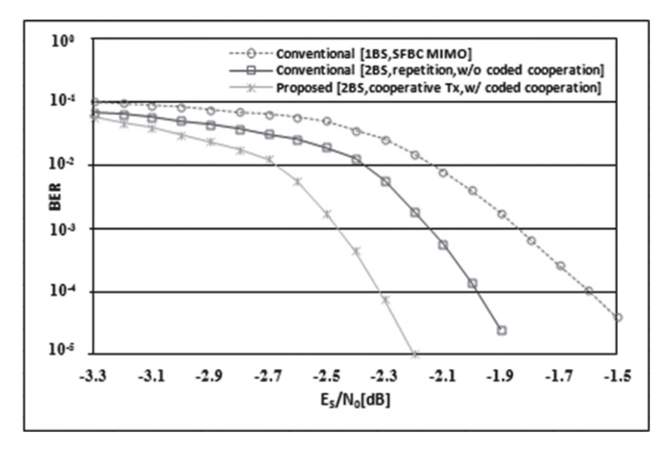


图 4　仿真结果 - 使用 QPSK 的 1/3 率编码协作模型

正如图 4 显示，与两个传统方案相比，提出的方案提高了性能。2BS 编码协作传输方案比 1BS SFBC 多收益 0.6dB，比 2BS 传统方案多收益 0.3dB。

5. 结论

本文总结了数字电视广播中 MIMO 等相关技术的发展情况；描述了 DVB-T2 标准等相关内容；研究了 DVB-T2 的编码协作传输方案；提出了 DVB-T2 系统中基于两个和三个基站的编码协作传输方案；最后进行了在慢瑞利衰弱信道下相应的性能模拟。

从仿真结果可看出：编码协作方案与基于一个和两个基站的传统传输方案相比在系统性能和协作分集方面都有一定优势，此外编码协作方案在提高 DVB 系统信道性能方面也有显著成果。还可以通过协作方案的优化设计进一步提高系统性能。另外，编码协作的有效功率分配和速率适配传输方案还有待进一步研究。媒

参考文献

[1] El-Hajjar M, Hanzo L. A Survey of Digital Television Broadcast Transmission Techniques[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(4):1-26.

[2] 胡留军，鲁照华，陈艺戬等．多天线技术发展趋势探析 [J]. 现代电信科技，2014, (12):5-9.

[3] Cheng T, Peng K, Yang F, et al. A Near-Capacity MIMO Coded Modulation Scheme for Digital Terrestrial Television Broadcasting[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2015, 61(3):367-375

[4] Radmard M, Majd M N, Chitgarha M M, et al. Spatial diversity gain of MIMO single frequency network in passive coherent location[J]. Scientia Iranica, 2014, 21(6):2186-2199.

[5] 魏泽华．3D MIMO 系统下行多小区联合传输研究 [D]. 北京邮电大学，2015.

[6] Nasser Y, Helard J, Crussiere M, et al. Efficient MIMO-OFDM Schemes for Future Terrestrial Digital TV with Unequal Received Powers[C]// in Proc. of IEEE International Conference on Communications, 2008. ICC ' 08. 2008:2021 - 2027.

[7] Bahgat N M, Khalil D E S, El-Ramly S H. Energy efficient design of DVB-T2 constellation demapper[C]// Quality Electronic Design (ISQED), 2015 16th International Symposium on. IEEE, 2015.

[8] Sugaris A, Reljin I. DVB-T2 technology improvements challenge current strategic planning of ubiquitous media networks[J]. Eurasip Journal on Wireless Communications & Networking, 2012, 2012(8):701-710.

[9] Kulkarni A N, Sharma S K. Frequency Reconfigurable Microstrip Loop Antenna Covering LTE Bands With MIMO Implementation and Wideband Microstrip Slot Antenna all for Portable Wireless DTV Media Player[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2013, 61(2):964-968.

[10] 欧洲电信标准化协会．ETSI EN 302 755 V1.4.1[DB/OL]. http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302700_302799/302755/01.04.01_60/en_302755v010401p.pdf, 2015(7).

（**作者单位**：国家新闻出版广电总局机关服务局技术保障部）